多能源电网的综合规划：概念与挑战

Marwan Mostafa[1]*、Daniela Vorwerk[2], Johannes Heise[1], Alex Povel[3], Natalia Sanina[4], Davood Babazadeh[1], Christian Töbermann[4],Arne Speerforck[3], Christian Becker[1] 和 Detlef Schulz[21]汉堡工业大学电力与能源技术研究所，德国汉堡[2] 赫尔穆特·施密特大学电力系统专业，德国汉堡[3] 汉堡工业大学工程热力学研究所，德国汉堡[4]吕贝克应用科学大学，德国吕贝克 * marwan.mostafa@tuhh.de

摘要——为实现日益严格的气候目标，并最终使德国工业大都市的能源供应脱碳，当前重点是逐步淘汰核电，继而淘汰煤炭和燃气，同时增加可再生能源的使用，并采用氢作为清洁能源载体。尽管家庭和交通运输部门的能源供应最终可能要实现全面电气化，但仍需经历一个过渡阶段，因为配电网如此大规模且快速的扩建并不可行。此外，德国工业界已表示，计划将氢作为实现碳排放目标的主要策略。这给现有的配电网、燃气网络和供热管网带来了挑战。因此，有必要整合这些网络的规划与开发流程，以最大限度地提高效率，并在转型过程中确保供应安全。本文旨在阐明这些挑战，并提出新颖的概念，将这三种网络作为一个多能源电网进行综合规划。

I. 动机

2021年，汉堡市就一项新的、具有法律约束力的气候计划进行了表决。该计划设定了更严格、幅度更大的碳排放目标，并将碳中和目标从到2050年相较于1990年减排80%提升至减排95%2045 [1]。由于配电网容量不足，且电网扩容时间紧迫，仅靠电气化无法实现这些气候目标。尤其是，工业能源需求高，而城市化程度高、建筑密集的城市特征，以及极少的风能优先发展区，都限制了本地可再生能源的开发空间。综合电网发展规划研究项目 iNeP（德语“I ntegrierte Netzentwicklungsplanung”）旨在制定一种通用方法和流程，将电力、燃气和供热这三类能源网络各自的规划流程整合为一个流程，并形成电网扩建路线图。

综合电网规划面临的主要挑战，列举如下：数据可用性不足、缺乏通用的情景框架、部门耦合技术层出不穷、新型能源生产技术、能源安全，以及各种特性和迄今为止，三种能源载体的消费者在时间和温度方面存在依赖性。部门耦合技术尤其给现有的需求预测以及电网规划方法和流程带来了复杂挑战。

本文提出了不同的理念，以应对这些挑战，并在为实现气候目标而必须进行部门耦合的背景下，推动燃气、供热和电网的综合规划。

II. 电网规划 – 研究现状

本节简要介绍能源网络规划的研究现状，并阐述未来方法所需的条件及相关思路。

A. 需求预测

传统上，能源供应商与消费者是彼此独立、空间上相互分离的主体，因此分别需要输电网和配电网。如果二者在时间上也存在差异，则需要储能容量。此外，在预测电网和供给扩展需求时，供应总是跟随需求。目前，需求测算较为粗略，依赖缺乏灵活性的已知历史数据，且未与其他部门进行综合考量。

未来，能源需求必须变得更加灵活多变。事实上，只要可行，需求或许会开始跟随供应。此外，许多尚待建立的技术将打破有用能与一次能源之间的联系。传统上，成熟的能源路径寥寥无几：煤炭通常用于发电，太阳能和风能也可发电，而燃气通常满足热能需求。最终，太阳能和风能或许可以首先用于生产燃气，而燃气又可能是氢或合成天然气；两者都能够满足广泛的绿色有用能需求。

B. 传统电网规划方法

一般而言，城市网络由三种不同的能源网络组成（电网、燃气网和热能网）。

1) 电网

VDE Forum Netztechnik/

电网运行 (FNN) [2] 的规划原则适用于德国电网的规划。电网规划既考虑消费者的最大功率，也考虑运行设备的最大输送容量。

2）燃气网

燃气网络遵循德国燃气与水技术科学协会（DVGW）的规划原则和规则 [3]。年用量和标准温度相关负荷曲线用于确定需求，燃气网络至今仍是根据这些需求设计的。

3）供热网

区域供热网遵循供热、制冷与热电联产能效协会（AGFW）的规划原则 [4] 。过去，由于能源的配电和使用几乎没有灵活性，电网规划完全基于对静态需求的预测 [5]。

III. 多能源电网的新型规划概念与方法

本文提出的综合电网规划总体概念如图1所示。情景和框架是综合规划的一部分，因为在此阶段就需要跨部门思维。综合规划的下一步是多能源电网建模。最后，借助适当的优化工具支持电网扩建规划。

A. 中性单元区域

在采用综合方法对三种不同能源载体进行需求预测和电网规划时，定义空间范围明确的中性单元区域或许是明智之举。这些区域可作为任意分辨率下区域化描述的基础

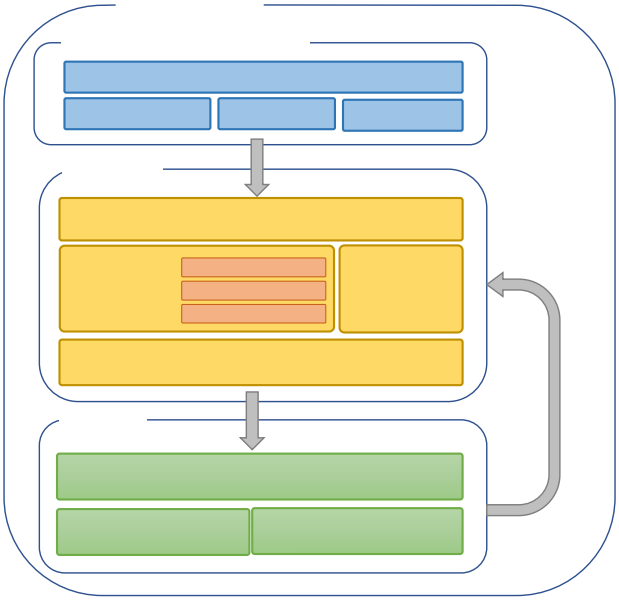

图1 综合规划的总体概念。

以便在配电网层面进行考量，并且其划分应独立于具体的能源载体。它们突破了电力、燃气或供热管网电网规划中的传统标准值。其特征描述不应仅包括能源方面的要素，以及三种能源载体电网规划的标准经验值（例如 [6]–[9] 所示），还应考虑其他因素，以便更准确地预测未来的城市发展和人口变化。

1) 中性网格单元区域的表征

例如，在表征中性单元区域时，应考虑表1所列的以下主题及相应示例方面。

通过描述这些方面，可以制定具体的数值关键因子。将因子表述为数值，一方面可以比较各单元区域，另一方面可以将发展情况和相互依存关系表示为数学相关关系。例如，保护区或建筑物数量等数值似乎与中性单元区域的面积存在合理关联。发电或储能的装机容量以及电网容量可以与当前需求进行比较，而其他关键因子则可通过设定参照关系来确定，例如将私家车数量与居民数量相比较。这些因子有助于了解某个区域的可变性，以及具体趋势将如何因地而异地发展。应对此进行详细分析，确定哪些数值可能长期保持恒定和稳定，哪些可能迅速变化，以及关键因子之间的相互依存关系有多强，例如可使用统计相关性检验 [10]。通过情景分析法 [11]–[13] 等技术，可以考虑这些相互依存关系，以进行未来估算。还必须考虑哪些关键因子可控，并能通过综合电网规划的方法产生积极影响，哪些则只取决于外部因素。

在这种方法中，假设中性单元区域的所有特征在单元内部都是均一的。此外，还应提及相邻区域及其特征具有高度相关性，因为单元边界的划分是任意的，具体将在下一节中说明。

2）中性单元区域的地理设计

下面简要介绍中性单元区域的三种可能形状：城市区、栅格和浮动单元，如图2所示。

首先，可将单个城市区作为研究对象，因为基于此类区域，可以获得有关过去的城市、人口和社会经济方面的详细统计数据，以及有关未来发展的预测 [14]。假设每个城市区都可通过其平均参数大致加以描述，但对于规模较大且内部结构高度不均一的区域，这种做法存在不足。第二种方法是使用等距栅格划分中性单元区域，这一缺点

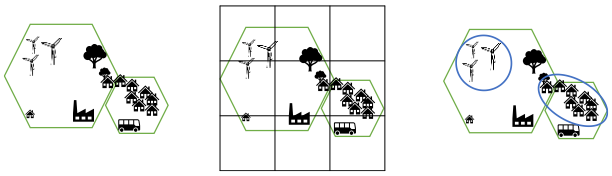

图2 中性单元区域的地理设计方法。

可以得到克服。与可通过地理归属轻松纳入这两种中性单元区域的 GIS数据不同，取自 [15], 的其他数据无法直接从区级统计数据中转移，因此必须找到合适的分配系数，例如建筑物所占比例。无论采用城市区还是栅格，地理边界都从一开始便已固定，其内容则在之后用于确定关键因素。与此相反，“浮动单元”方法应能够根据合理且同质的结构（例如居民点、保护区、工业区或商业区等），确定单元区域的边界。划定此类浮动区域是一项重大挑战，因为必须选择适当的方面作为主要决定因素，而且算法需要得到详细指示，明确如何具体界定单元区域的边界。 另一个挑战涉及规模与同步性。单元区域越小，就越难对其发展情况和同步性因素作出可靠判断。

3) 中性单元区域的需求满足方案

以综合方式满足整体能源系统的需求，可以有多种方案。其中包括各种终端技术设备，也包括集中式或分布式储能设施、发电或来自交通层级的供能，以及不同电网之间的耦合设备，例如电转热、电转气或其他技术。对于交通领域，满足方案例如包括私人交通或公共交通。

将需求满足与需求本身完全分离，可为满足方案的设计提供很大的自由度。一开始就应考虑一些因素，以便初步缩小解空间：

- 气候中和这一主要边界条件，意味着有些技术最迟到2045年就不能再使用。
- 应制定一些绝对极端方案，以了解可能的边界。
- 有些技术彼此竞争，采用冗余技术可能没有意义，甚至不可行。
- 应考虑基于当前关键因素形成的需求满足方案初始状态，并对现有能源系统内大幅修改的现实可行性进行审慎评估。
- 应明确该方案的目标。

覆盖概念的目标可能相当多样。除了最小化一次能源输入之外，单个单元区域的高自给自足率或最低建设成本也可以纳入研究范围。对于多目标方法，可以对各个目标进行加权，并使用贪心算法等启发式方法执行优化。[16]。所开发的初始关键因素为单个单元区域内的满足概念提供了初步方法，并且可能据此排除某些解决方案。例如，供热管网的运行只有在特定供热密度水平下才具有经济性。个别地方供热网可能会布局在地方工业附近，周围具有密集的建筑结构。此外，建筑物数量较多的区域可能适合未来扩展太阳能。新技术的虚拟建设，或改变中性单元区域中的技术构成比例，都会随时间改变其关键因素，并可能对其他因素产生影响；这些影响可以利用基于关键因素的有效相关关系进行分析。

4) 从满足概念到电网规划

将中性单元区域视为一个严格受限的区域，并将其中的一切集中到一个节点上，则每个时间步都必须满足其整体功率平衡。对于电网规划本身而言，设计输送容量时需要了解的不是能源量，而是最大功率流。要从年需求量得出特定能源载体（电力、燃气或热能）所需的功率输送值，必须考虑需求的时间依赖性。初步可通过采用标准负荷曲线[17], [18] 或温度相关负荷曲线（例如，关于热泵的曲线见 [19] ）来实现。特定能源载体所需输送的功率可根据相关技术的效率或性能系数进行估算。它们所占的份额也是

表1 中性网格单元区域表征的领域和方面。

主题	方面
能源方面	• 常规电厂、可再生能源、储能设施 • 热密度 • 太阳能利用潜力
社会—经济	• 人口统计、老龄化结构 • 居住空间 • Income
地理	• 基地面积 • 保护区，森林
出行与交通	• 汽车密度 • 公共交通站点 • 充电站 • 公交车场 • 停车场/停车楼
建筑和消费者结构	• 建筑物数量 • 本地供应与贸易 • 工业场地

中性单元区域的一个特征（见表1）。向一个单元区域输送功率的最大时点，可以反映所需的输送能力。所有单元区域不一定会同时出现这种情况，且这在很大程度上取决于各单元的具体需求满足概念。对于改进的方法，可以研究灵活性如何有助于降低最大功率输送值（见E节）。

B. GIS数据、需求与预测

正如 II.A 所提示的，电网规划本质上是一个空间流程，能源电网运营商长期以来一直依靠地理信息系统开展工作。geopandas 或 QGIS 等互惠互利的开放工具，以及 OGC 的 GeoPackage 等开放标准，都有助于此。此外，开放政府范式也支持开放数据提供，例如汉堡市提供的 ALKIS 数据。在获得（开放或内部）数据后，这些工具能够构建纵向集成的数据管道，从原始数据中提取丰富的洞见。得益于开放且成熟的标准，这些数据管道还可以横向扩展：ALKIS 是一种全国通用格式。只要以 GeoPackage 格式提供，任何人都能轻松解析。在汉堡市背景下构建的数据管道只需稍作调整，便可在全国范围内使用

汉堡供热地籍 [20] 是此类纵向数据管道的一部分。这个数字化供热地籍包含建筑街区的年度热耗数据。它依据 [21] 中概述的原始方法重新实现。与原始公开版本相比，它提供了：

- 采用单体建筑级数据，而非按建筑区块聚合的数据（实质上是撤销在线版本中先前引入的人为聚合），
- 功能增强：o 功率（能流）级计算，o 集成内部企业数据，
- 提升性能并进行现代化改造，后者主要通过采用现代数据格式（GeoPackage、JSON 等）以及数据源（汉堡市的网络API）实现。

建筑物的总体热损失可建模为通过平壁的热流，表示为

$$\dot{Q} = kA\Delta T = kA(T_{\text{outer}} - T_{\text{inner}}), \qquad (1)$$

其中，k 为传热系数，A 为建筑物的围护面积。虽然无法逐栋确定这两个参数，但可以假设它们近似为常数。已知年热需求，假设室内温度恒定为 20 °C [22]，并且根据气象数据已知室外（即环境）温度 [23],，即可通过积分（求和）求得因子 $c = kA$ 。

已知c 和日平均环境温度，也就能确定日平均热损失流。对其进行积分（乘以）各自一天的时长，便可得到一个最终公式，与度日[22]类似：

$$Q_{\text{d}} = Q_{\text{a}} \frac{T_{\text{i}} - T_{\text{o}}}{\sum_{j=1}^{j=n} T_{\text{i}} - T_{\text{o,j}}} \qquad (2)$$

将这一启发式方法应用于汉堡 ALKIS 中的每栋建筑，即可得出每栋建筑的近似日热耗。这些数据随后可用作后续需求满足方案的输入。

预测采用不同的方式处理，即在 Mesa（Python）框架中使用基于智能体的建模 [24]。将上一步构建的供热地籍作为时间步零时的现状，并在汉堡全市范围内初始化智能体（家庭）。目前这类建模的主要用途是追踪在用供暖技术的发展情况（燃气和燃油锅炉、热泵、区域供热、电热棒等）。

为智能体分配一组属性（模型参数），例如初始供暖技术（根据已知的汇总数据随机初始化）、收入和支出、转换技术的意愿（本质上是社会和政治观点等因素的综合体现）、初始资金、储蓄额度等。在每个时间步中，智能体的部分属性会发生变化（其他属性则始终保持不变）。因此，如果在其有限的认知范围内，这一决定是理性的，它们可能会转换供暖技术，例如从燃气锅炉改用热泵。滞后效应和惯性用于模拟人类的非理性行为。

推动供暖技术在各个时间步发展的一个主要因素是其成本。可以针对每种技术和每个时间步调整成本。因此，可以用成本时间序列来表达政治支持（通过财政激励实现）、技术突破（甚至只是稳步进步）等情景。由此产生的影响会体现在技术随时间发展的差异上。这种自下而上的方法有一个核心优势：假设立法者要求或希望到2045年，私人家庭中的热泵普及率达到90%。通过蒙特卡洛元分析，可以考察大量参数集及相应情景，并筛选出符合目标的情景。这样不仅能实现目标，还能明确实现目标的路径，从而得出可采取行动的见解（“到2030年，将价格降低40%。”）。尽管模型仍较为简单，但可以任意加入数据和决策逻辑，从而进行更精确的分析。主要挑战在于获取输入数据，因为加入逻辑要容易得多。

C. 基于GIS数据的电网模型

由于缺少有关配电网的地理信息系统数据（原因是技术障碍，尤其是法律障碍），因此需要在该研究项目中为相应的模拟生成城市电网。借助 Fraunhofer 内部程序“DaVe”，可以生成初步的电网设计；“DaVe”是

（能源）数据分析与处理（德语“(Energie-) **Da**tenanalyse und -**Ve**rarbeitung”） [25]。该程序可基于开放数据自动生成网络模型。

为了构建低压等级的网络拓扑，研究人员已开发出相应方法，可根据给定的地理信息推导网络拓扑 [25]。为确定住宅接入节点，他们从开放街图（OSM）数据中获取建筑地块的中心点。随后，需要确定合适的网络接入点。此类方法假定线路沿街道铺设，并据此确定最近街道上距离住宅接入节点最近的点。根据确定的网络节点，接下来生成合适的线路，将建筑物彼此连接。首先，将所有建筑节点连接到相应的网络接入点。然后，沿现有街道铺设线路，将各网络接入节点相互连接。此外，还会在道路交叉口设置额外的节点。

D. 聚合为多能电网模型

基于图论的方法能够表示能源电网，并通过将部门耦合技术表示为连接多个电网的顶点，实现多能源电网的统一表示；能源载体由边表示，而能流方向则由连接顶点的边的方向表示。最终，整个多能源电网可表示为一个图，如图 3 所示。

除了迄今应用于各个部门的电网计算方法外，目前也已有适用于区域电网的跨部门电网计算方法 [26] 。其中必须提及 [27] 中所述的方法，该方法能够计算耦合的区域能源系统。该方法使用跨部门效率矩阵来表示能源网络之间的耦合，并采用牛顿-拉夫逊法求解耦合后的电力、热能和燃气潮流方程。然而，这种方法无法应用于配电网等规模更大的能源系统，因为它未考虑负荷变化对网络结构的影响。而在配电网络中，必须根据能耗的变化调整网络结构，以避免未来出现电网瓶颈。[28], [29] 展示了多能系统的能流计算方法。然而，这些方法未将氢作为能源载体，也未考虑电网与燃气网之间的耦合技术，因此在这方面仍需扩展。为进行潮流计算，我们将对这些方法加以调整，并在多能源电网的图论模型中予以实现。

在 [30] 中，利用图论确定电动汽车充电器的最佳位置。我们可以在项目中采用更先进的图论方法，根据成本和电网约束，确定电解厂等电网耦合点的最佳位置。

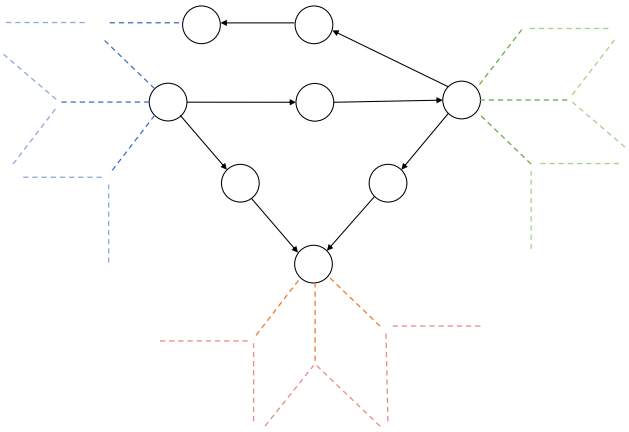

图3 多能源电网的图论表示。

基于图论的方法在解决复杂的电网优化问题方面也具有显著优势。它能够应用能源路由算法和成本最小化算法，[31]中便展示了此类应用。

E. 灵活性作为电网规划的决策标准

如前所述，未来的能源需求将更加动态。因此，灵活性将在未来的能源网络中发挥决定性作用。借助能源配电网中的灵活性，可以避免短期电网瓶颈。此外，在规划阶段的早期考虑灵活性选项，有助于降低电网扩建成本。部门耦合和储能设施尤其为跨能源部门利用灵活性提供了机会。

第“D”节介绍的方法将扩展为纳入灵活性考量。其目标是表征储能和耦合聚合体所提供的灵活性，并将其纳入电网优化。这种考量的一项优势是，可以将电网扩建规划与耦合聚合体及储能单元的发展直接进行比较，例如，使用与蓄热系统协同运行的热泵为电网提供服务。由于这些耦合单元能够提供灵活性并以服务电网为目标运行，因此可以据此调整电网扩建。另一项优势是，还可以优化储能单元和耦合元件的布局，从而提升系统韧性[32]。

IV. 验证

本研究项目的一个重要阶段是验证采用新方法所取得的成果。我们将使用这些新方法构建并计算测试案例，作为产业合作伙伴使用其内部最先进的电网规划与计算工具进行计算的依据。随后，我们将利用这些结果分析其可能融入配电网运营商规划流程的程度。本项目旨在制定综合电网扩建路线图，为

立法者和电网运营商在汉堡市制定电网发展与扩建计划时提供指导。还应与其他地区的电网运营商进一步合作，研究本文所述方法是否适用于电网结构和负荷结构各异的城市。

V. 结论与展望

本文阐述了在部门耦合能源系统中，脱碳、分布式发电和需求预测给配电网规划带来的挑战，并介绍了应对这些挑战的新概念和方法，共同构成一种综合性的综合电网规划与发展方法。该方法首先将现有基础设施特征作为初始依据，继而对现有电网进行建模，并开展需求预测与满足、潮流计算，最终实现电网优化并充分发挥其潜力。本文还介绍了利用当前电网规划方法尚未纳入的灵活性的可能性。该研究项目目前仍处于起步阶段，本文介绍的方法为项目后续规划提供了方法论框架。

目前正在开发 DaVe 程序的扩展版本，除电网外，还将为燃气电网增加相同的功能。目前，DaVe 覆盖德国电力行业的所有电压等级，以及欧洲燃气行业的高压级。此外，还可以生成基本的电网元件。

本文探讨了中性单元区域的方法，并提出通过从多个主题维度（包括能源、社会经济、地理、出行与交通以及消费者结构）发展各种关键因素，对其进行刻画。这些单元区域为对整个工业大都市进行综合、区域化考察奠定了基础。中性单元区域内的发展变化，可通过特定关键因素及其相互依存关系的变化显现出来。对于需求满足方案而言，在开始时提出一些限制和边界条件，有助于使问题保持清晰。

致谢

本研究项目由德国联邦经济事务与气候行动部（BMWK）资助，协议编号为 03EWR007A-V。

作者谨向工业项目合作伙伴 Gasnetz Hamburg GmbH、Stromnetz Hamburg GmbH 和 Hamburger Energiewerke GmbH 致谢，感谢他们的支持，并分享电网运行与规划中的流程及挑战。

参考文献

[1] 《汉堡气候计划首次修订版》，2019。[在线]。获取地址：https://www.hamburg.de/contentblob/13899086/749a6e50662c96eee81d370f1b0cb631/data/d-first-revision-hamburg-climate-plan.pdf

[2] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.,“110千伏电网规划通则 VDE-AR-N 4121（VDE- AR-N 4121）应用规则：2018-04。”

[3] DVGW 规则体系，“DVGW 网站：规则与标准。” https://www.dvgw.de/leistungen/regeln-und-normen[4] AGFW e. V.，“AGFW 规则体系第 4 部分：热力分配（全部）”，2022年5月。 [在线]。可访问：https://www.agfw-shop.de/regelwerk/4-warmeverteilung/agfw-regelwerk-bereich-4-waermeverteilung-print-1.html[5] A. Orths 等，“能源系统集成带来的灵活性：促进各部门间的协同效应”，《IEEE 电力与能源杂志》，第 17 卷，第 6 期，第 67–78 页，2019年11月，doi: 10.1109/MPE.2019.2931054。[6] K. Heuck、K.-D. Dettmann 和 D. Schulz，《电力供应》。威斯巴登：Springer Fachmedien Wiesbaden，2013。doi: 10.1007/978-3-8348-2174-4。[7] H. Nagel，《系统化网络规划》，第 2 版。柏林：VDE出版社，2008年。[8] G. Cerbe、B. Lendt、K. Brüggemann、M. Dehli 和 F. Gröschl 编，《燃气技术基础：燃气采购—燃气输配—燃气使用》，第 8 版，全面修订版。慕尼黑：Hanser，2017年。[9] P. Konstantin，《区域供热实践手册》。柏林、海德堡：Springer Berlin Heidelberg，2018年。doi: 10.1007/978-3-662-55911-6。[10] Z. Ali 和 Sb. Bhaskar，“研究与数据分析中的基本统计工具”，《印度麻醉学杂志》，第 60 卷，第 9 期，第 662 页，2016年，doi: 10.4103/0019-5049.190623。[11] P. Bishop、A. Hines 和 T. Collins，“情景构建的现状：技术概述”，《远见》，第 9 卷，第 1 期，第 5–25 页，2007年2月，doi: 10.1108/14636680710727516。[12] Kosow Hannah 和 R. Gassner，《未来与情景分析方法：概述、评估与选择标准》。波恩：德国发展政策研究所，2007年。[13] W. Weimer-Jehle、S. Vögele、W. Hauser、H. Kosow、W.-R. Poganietz 和 S. Prehofer，“社会技术能源情景：最新进展与基于交叉影响平衡法的方法”，《气候变化》，第 162 卷，第 4 期，第 1723–1741 页，2020年10月，doi: 10.1007/s10584-020-02680-y。[14] H. Stadtteil-Profile，“汉堡城区概况：2020年报告年度”，第 204 页，2020年。[15] 汉堡地理门户。[在线]。可访问：https://geoportal-hamburg.de/geo-online/[16] H. Benker，《使用计算机代数系统进行数学优化》。柏林、海德堡：Springer Berlin Heidelberg，2003年。doi: 10.1007/978-3-642-55736-1。[17] H. Meier、C. Fünfgeld、T. Adam 和 B. Schieferdecker，“VDEW代表性负荷曲线”。VDEW 法兰克福（美因河畔），1999年。[在线]。可访问：https://www.bdew.de/media/documents/1999_Repraesentative-VDEW-Lastprofile.pdf,

[18] 德国市政企业协会（VKU），“天然气标准负荷曲线处理指南”，2018年3月。[在线]。可访问：https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Sparten/Energiewirtschaft/Gasthemen/nach_Leitf aden_SLP.pdf[19] T. Buber、S. von Roon、A. Gruber 和 J. Conrad，“电驱热泵和电蓄热式加热器的需求响应潜力”，载于《IECON 2013——第 39 届 IEEE 工业电子学会年会》，奥地利维也纳，2013年11月，第 8028–8032 页。doi: 10.1109/IECON.2013.6700475。[20] “汉堡热能地图”，hamburg.de。https://www.hamburg.de/energiewende/waermekatast er/[21] I. Dochev、H. Seller 和 I. Peters，“将能源原型分配给数字地籍并估算建筑热需求：德国汉堡案例”，《环境与气候技术》，第 24 卷，第 1 期，第 233–253 页，2020年1月，doi: 10.2478/rtuect- 2020-0014。[22] VDI 4710 第2部分，建筑技术设备中的气象数据——度日。2007年。访问日期：2022年6月1日。 [在线]。可访问：https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4710-blatt-2-meteorologische-daten-in-der-technischen-gebaeudeausruestung-gradtage[23] 汉堡自由与汉萨市，“汉堡空气监测网络—气象学—温度—汉堡自由与汉萨市”，hamburg.de，2022年4月27日。https://luft.hamburg.de/clp/temperatur/（访问日期：2022年4月27日）。[24] Mesa 核心团队及贡献者，Mesa：使用 Python 进行基于智能体的建模*3+*。Mesa 项目，2022年。访问日期：2022年4月28日。[在线]。可访问：https://github.com/projectmesa/mesa[25] T. Banze，“DaVe——一种基于开放数据自动生成区域特定电网的软件工具”，2020年，doi: 10.13140/RG.2.2.33283.94248。[26] K. Hoth 等，“兼顾韧性、经济性和可持续性的智能综合能源系统最优运行整体仿真方法”，《基础设施》，第 6 卷，第 11 期，第 150 页，2021年10月，doi: 10.3390/infrastructures6110150。[27] X. Liu 和 P. Mancarella，“多载能区域能源系统中电-热-气综合网络的建模、评估与桑基图”，《应用能源》，第 167 卷，第 336–352 页，2016年4月，doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.089。[28] G. Zhang、F. Zhang、K. Meng、X. Zhang 和 Z. Y. Dong，“一种用于多能源系统能流计算的基于不动点的分布式方法”，《IEEE 可持续能源汇刊》，第 11 卷，第 4 期，第 2567–2580 页，2020年10月，doi: 10.1109/TSTE.2020.2966737。[29] X. Tian、L. Zhouhong、P. Zhaoguang 和 S. Hongbin，“多能源流耦合网络计算的建模与仿真”，”发表于2018年国际电力系统技术会议（POWERCON），广州，2018年11月，第992–998页。doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602267.[30] T. G. Altundogan、A. Yildiz和E. Karakose，“基于图论的遗传算法电动汽车充电站选址优化方法”，发表于2021年智能系统与应用创新会议（ASYU），土耳其埃拉泽，2021年10月，第1–5页。doi: 10.1109/ASYU52992.2021.9598951.[31] R. Wang、J. Wu、Z. Qian、Z. Lin和X. He，“能源局域网中的一种基于图论的能源路由算法”，《IEEE工业信息学汇刊》，第13卷第6期，第3275–3285页，2017年12月，doi: 10.1109/TII.2017.2713040.[32] M. Zare Oskouei、H. Mehrjerdi、D. Babazadeh、P. Teimourzadeh Baboli、C. Becker和P. Palensky，“电力系统的韧性导向运行：一种基于分层分区的方法”，《应用能源》，第312卷，文章编号118721，2022年4月，doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118721.[33] A. J. Monticelli、A. Garcia和O. R. Saavedra，“快速解耦潮流——假设、推导与测试”，《IEEE电力系统汇刊》，第5卷第4期，第1425–1431页，1990年11月，doi: 10.1109/59.99396.[34] K. Nagaraj、A. Starke和J. McNair，“GLASS：一种用于基于软件定义网络的智能电网DDoS安全的图学习方法”，发表于ICC 2021——IEEE国际通信会议，加拿大魁北克省蒙特利尔，2021年6月，第1–6页。doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500999.[35] P. Goyal、P. Chhura、V. Khandelwal和S. Agrawal，“利用图论矩阵方法确定电动汽车采用指数”，发表于2020年商业可持续发展的研究、创新、知识管理与技术应用（INBUSH），印度大诺伊达，2020年2月，第104–110页。doi: 10.1109/INBUSH46973.2020.9392157.[36] A. Sinha、S. Chakrabarti和O. P. Vyas，“基于图论的分布式电网恢复”，发表于2020年IEEE可持续能源、信号处理与网络安全国际研讨会（iSSSC），印度奥迪沙邦古努普尔，2020年12月，第1–6页。doi: 10.1109/iSSSC50941.2020.9358911.[37] K. Nakayama和N. Shinomiya，“基于智能电网网络回路图论的分布式控制”，发表于超现代电信与控制系统国际大会，俄罗斯莫斯科，2010年10月，第957–964页。doi: 10.1109/ICUMT.2010.5676490.[38] A. J. Monticelli、A. Garcia和O. R. Saavedra，“快速解耦潮流：假设、推导与测试”，《IEEE电力系统汇刊》，第5卷第4期，第1425–1431页，1990年11月，doi: 10.1109/59.99396.[39] H. Nagel，《系统化网络规划》，第2版。柏林：VDE出版社，2008年。